

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIA TEADUSKOND

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Andra Ainsaar

**AKNA PÄIKESEVARJU TOIME EESTI KLIIMAS -
ANALÜÜS SIMULATSIOONIPROGRAMMIGA
COMFEN**

Bakalaureusetöö ökotehnoloogias

Juhendaja: PhD Tõnu Mauring

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2013

Sisukord

1. Sissejuhatus	3
2. Teoreetiline ülevaade	5
2.1. Päikese kiirgus Eestis	5
2.2. Päikese varjestamine	6
2.3. Päikesevarjude mõju sisekliimale ja energiavajadusele	7
2.3.1. Valgustatus	9
2.3.2. Soojusmugavus	11
2.4. Hoonesimulatsioon	12
3. Materjal ja meetodika	13
3.1. Kliimaandmed	13
3.2. Simulatsiooniprogramm COMFEN	13
3.3. Uuritav Nooruse 1 hoone	14
3.4. Hoone parameetrite defineerimine	15
3.5. Päikesevarjude tüübid	16
4. Tulemused ja analüüs	18
4.1. Päikesevarjud erinevates ilmakaartes	18
4.1.1. Põhjafassaad	18
4.1.2. Idafassaad	19
4.1.3. Lõunafassaad	20
4.1.4. Läänefassaad	21
4.1.5. Vaheilmakaared	22
4.2. Nooruse 1 hoonel simuleeritud päikesevarjud	23
4.2.1. Peafassaad	23
4.2.2. Vasakfassaad	25
5. Arutelu	29
6. Kokkuvõte	32
7. Summary	34
8. Tänuavaldused	36
9. Kasutatud kirjandus	37
10. Lisad	40

1. Sissejuhatus

Hoone eesmärk on eraldada inimene väliskeskkonnast ning tagada teatud tasemel sisekliima, mis määrabki hoone energiatarbimise. Seega on fassaadil, kui kahe keskkonna vahelisel piirdel, oluline roll. Tasakaalu leidmine energiakulude vähendamiseks ja mugava sisekliima tagamiseks nõuab läbimõeldud otsuseid projekteerimise algusjärgus.[1] Varajaste valikute tegemiseks ja hoone energiatõhususe saavutamiseks kasutatakse üha enam simulatsiooniprogramme.

Sobiv akende suurus vastavalt orientatsioonile ja päikesevarjude kasutamine võimaldavad kontrollida päevavalgust ning päikese vabasoojust, mis on sageli kontorites peamisteks sisekliima probleemideks.[1] Põhja-Euroopas, kus kütmine moodustab suurema osa kogu energiatarbimisest, on oluline roll ka jahutusel [1]. Uuringud hoone jahutuskooormuse vähendamisest päikesevarjudega ilmusid juba 1940ndatel [2]. Päikesevarjud on passiivse arhitektuurilise jahutuse viise, mida kasutatakse kiirgusest tingitud ülekütmise ja räiguse vältimiseks, parandades seega ruumi soojusmugavust ja loomuliku valgustatuse taset.

Eestis hetkel kehtivate normide alusel on päevavalgusele esitatavad nõuded elamutele ja büroohoonetele üldsõnalised, jättes arhitektidele vabad käed. Tihti on tagajärjeks ebapiisava valgusega või hoopis peegeldusräigusega sisetingimused.[3] Seadusandluse teatud puudulikkuse tõttu on viimase 10-15 aasta jooksul ehitatud mitmeid suure klaaspinna osakaaluga kontorihooneid [4]. Arvestades, et lõunafassaad saab ligikaudu 13 korda rohkem otsest päikesekiirgust kui põhjasein ning intensiivne kiirgusperiood algab juba märtsis, on ka Eestis klaasfassaadidega kontorites Päikesest tingitud valgusräiguse ja ülekütmise probleeme. Samas on tõestatud, et sobiv loomulik valgustatus ja soojusmugavus suurendavad inimese heaolu ja töövõimet [3,5,6].

Käesoleva uurimustöö eesmärk on analüüsida Eesti kliimas eri tüüpi päikesevarjude mõju hoone sisekliimale ja energiavajadusele vastavalt fassaadi orienteeritusele ilmakaare suhtes. Uuring viiakse läbi simulatsiooniprogrammiga Tartu Ülikooli õppehoone näitel.

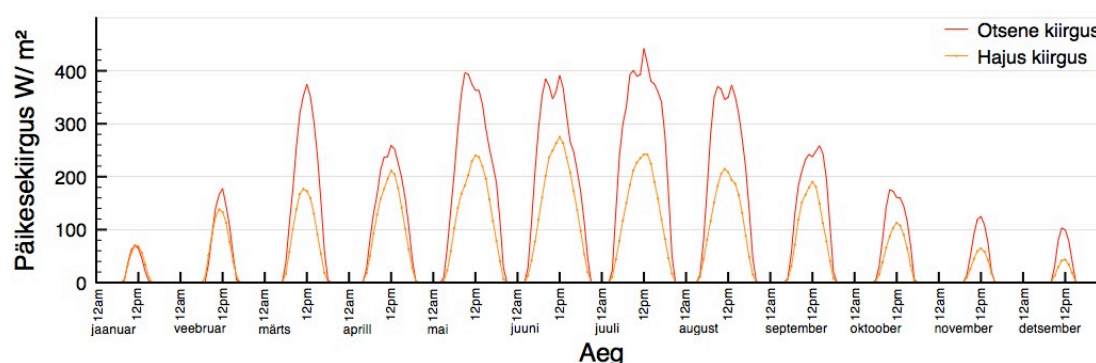
Töö sisuline osa on jaotatud kolmeks peatükiks, millest esimeses antakse teoreetiline ülevaade Eesti kiirguskliimast, päikesevarjude mõjust sisekliimale ja simulatsiooniprogrammide tähtsusest hoone projekteerimisel. Teises osas kirjeldatakse läbiviidud katse metoodikat ja kasutatud arvutiprogrammi ning kolmandas peatükis tuuakse välja peamised tulemused ja sellega seonduv arutelu.

2. Teoreetiline ülevaade

2.1 Päikesekiirgus Eestis

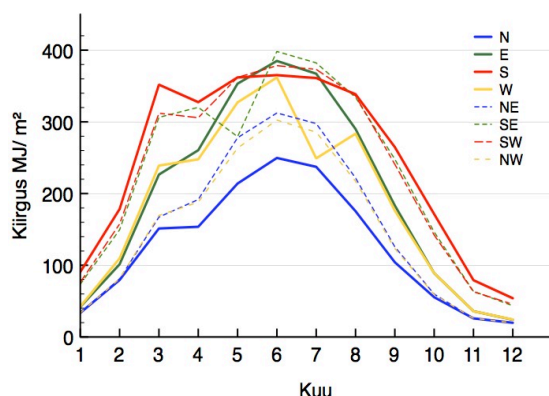
Päikesepaiste aega saab jagada võimalikuks ja tegelikuks kestuseks. Võimaliku kestuse korral ei arvestata atmosfääris kiirte refraktsiooni, kuid tegeliku kestuse määravad peamiselt päeva pikkus ja pilvisus, aga ka horisonti varjutavad objektid. Eestis moodustab päikesepaiste tegelik kestus keskmiselt 37-43% võimalikust. Üldiselt on Päikest suvekuudel ligikaudu kümme korda kauem kui talvel - kõige vähem detsembris ja kõige rohkem juunis. Enamasti on aastas katkematut päikesepaistet kuude lõikes 2-4 tundi, suurenedes märtsis 8-10 tunniseks ajavahemikuks. Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama andmete järgi on aastas keskmiselt päikeseta päevi 111 ja päikesepaiste kestus 6,5 tundi.[7]

Päikesekiirgus jõuab maapinnale otse- ja hajuskiirgusena, mille nähtavaid osasid nimetatakse vastavalt päikese- ja taevavalguseks [4]. Otsene kiirgus jõuab vaatlejani praktiliselt paralleelsete kiirte kimbuna ja hajus kiirgus poolsfääri kõikvõimalikest suundadest. Atmosfääri peamisteks hajutajateks on õhu molekulid, veeaur, aerosool ja pilved, mis mõjutavad lisaks Päikese kõrgusele ning albeedole kiirguse vootihedust. Horisontaalsele pinnale langenud summaarsest kiirgusest on suvel ülekaalus otsekiirgus ja talvel hajus kiirgus. Tõraveres saab aluspind juunikuu keskpäeval ligikaudu 5 korda rohkem summaarset kiirgust kui detsembris (joonis 1).[7]



Joonis 1. Otsese ja hajusa kiirguse tunni keskmised aasta jooksul horisontaal pinnale, Tõravere baasaasta programmis COMFEN.

Pinnale langevad kiirgus- ja valgustingimused olenevad koha geograafilisest laiusest, orienteeritusest ilmakaarte suhtes, Päikese asimuudist ja kõrgusest, pilvisusest, atmosfääri läbipaistvusest, aluspinna kaldenurgast ning albeedost. Kallakute erijuhu moodustavad vertikaalsed seinad, mille erineva orientatsiooniga summaarse kiirguse keskmisi kuusummasi iseloomustab joonis 2. Enamasti on vertikaalsete pindade kuusummad väiksemad kui horisontaalsetel.[7]



Joonis 2. Tõravere summaarse kiirguse keskmised kuusummad (1955-2000) erineva orientatsiooniga vertikaalsetel seintel.[7]

Põhjasuunaline sein saab otsekiirgust kõige vähem, peamiselt ainult suvekuudel ja aastasumma on üle 13 korra väiksem lõunaseinast. Talvel kujundavad põhjaseinal summaarse kiirguse hajus ja peegeldunud kiirgus ning lõunaseinad on otsekiirguse osas eelisolukorras.[7]

2.2 Päikese varjestamine

Päikesevarjud on passiivse arhitektuurilise jahutuse tuntumaid viise, mida kasutatakse päikesekiirgusest tingitud ülekütmise vältimiseks ning räguse ennetamiseks [3]. Väiliste aknakatete tõhusus seisneb kiirguse blokeerimises enne fassaadile langemist [8]. Varjudel on väga palju erinevaid võimalusi ning vastavalt vajadusele võivad olla fikseeritud või mehaaniliselt liigutatavad, vertikaalsed või horisontaalsed, sirmide või ribidena.[3] Samuti on oluline värvus, et tagada optimaalne valguse peegeldumine. Üldiselt on varjud heledad.[9]

Päikesevarjude kasutamise määrab fassaadi klaaspinna suurus, orientatsioon ja kliima. Põhjasuunalisel fassaadil otsekiirgust varjutama ei pea. Vastupidiselt lõunaseinale, mis saab kõige enam Päikese intensiivset otsekiirgust, mida on efektiivne piirata horisontaalsete varjudega. Ida ja lääne suunal on vastavalt hommikune ja pärastlõunane Päike madal ning mugava sisekliima tagamiseks on tõhusamad vertikaalseid varjud.[8]

Kõige problemaatilisemaks peetakse Põhja-Euroopas talvist madalat päikesekiirgust, mis paistab kaugele tuppa ja põhjustab peegeldusräigust ning ebamugavaid kontraste [10]. Samas on inimesed talvise päikese suhtes tolerantsemad, kuna sel perioodil on loomuliku valguse aeg lühem ja kiirgus aitab kaasa ruumi kütmisele [11]. Seega on talvel päikesepeaistelistes tingimustes võimalik suurem energia kokkuhoid, võrreldes pilvisemate piirkondadega [2].

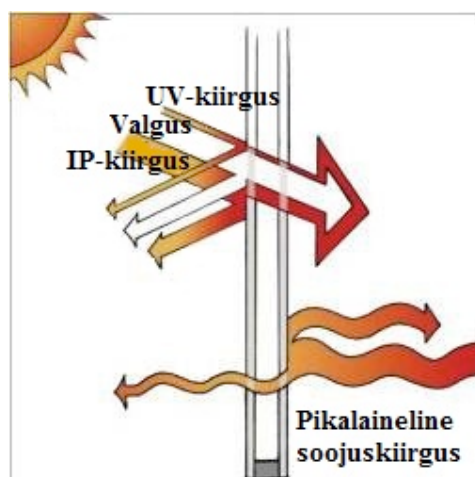
Kui aken on üleni varjus, väheneb päikese vabasoojuse hulk 80%, mis jahedas kliimas tähendab passiivse küttevõimaluse kadumist [12]. Samas ei ole akende täielik varjutamine vajalik, vaid pigem on olulisem tagada kaitse fassaadile langeva intensiivse otsekiirguse eest [2]. Mida suurem aknapind on varjutatud, seda ebamugavamaks võib muutuda vaade toast välja ja vähem päevavalgust jõuab ruumi. Seega on ribid tõhusad päikesekiirguse blokeerijad, kuid vähendavad olulisemalt ka loomuliku valguse juurdepääsu. Järelikult sobivad ribid akendele, mille ruumides tehakse rohkem arvuti- ja vähem paberipõhist tööd [11].

2.3 Päikesevarjude mõju sisekliimale ja energiavajadusele

Tänapäeval viibitakse üle 70% eluajast siseruumides, mistõttu on olulised inimese heaolu ja produktiivsust mõjutavad sisekliima komponendid: temperatuur, valgus, müra, ionisatsioon ja elektromagnetväljad [3,4]. Üha enam ehitatakse büroohoonete fassaad klaasist ja päikesekiirgus kujundab suurel määral sisekliima tingimusi ning energiavajadust [13].

Ruumi hea valgustuse tagab pigem hajuvalgus ning otsekiirgus põhjustab sageli ebamugavat peegeldust, mis on suuremaks probleemiks arvutitega töötajatele [3,10].

Tavaliselt kasutatakse liigse loomuliku valguse leevendamiseks sisemisi aknakatteid, kuid päikesekiirgus muutub tahke pinnaga kokku puutudes soojuseks (joonis 3). Nii toimivad suletud katted pigem kütteelemendina ja ruumis tekib kasvuhooneefekt, sest liigsoojus ei läbi hoone tarindit. Soojusmugavuse tagamiseks tuleb see eemaldada.[4] Enamasti kasutatakse selleks mehaanilist ventilatsiooni ja jahutussüsteeme, mis on ka külmas Põhja-Euroopa kliimas oluliseks energiakuluks.



Joonis 3. Päikesekiirguse läbimine aknast ning soojuskiirguse teke. [14]

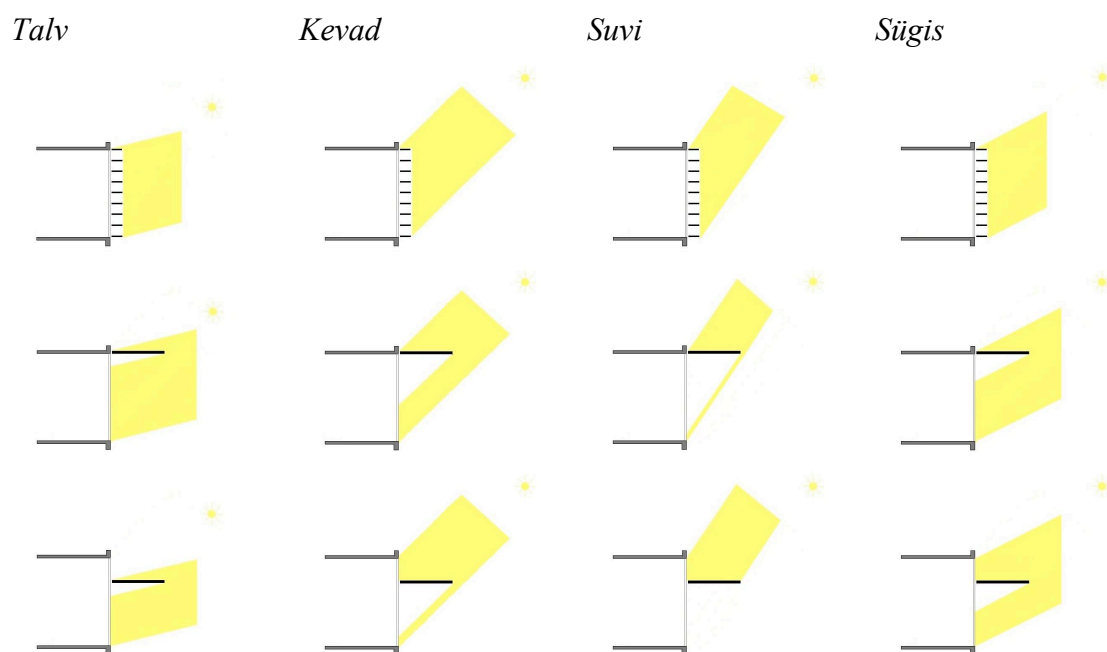
Akende mõju hindamisel sisekliimale arvestatakse soojajuhtivuse ja päikese läbilaskvusteguriga. Soojajuhtivus (U-arv) on soojustakistuse pöördväärtus, mis näitab soojakadu vattides läbi ühe ruutmeetrise piirde, kui temperatuuride erinevus kahel pool seina on üks Kelvin ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$). Päikese läbilaskvustegur (g-arv) on koefitsient nullist üheni, mis näitab kui suur osa aknale langevast päikesekiirgusest siseneb ruumi. Energiatõhususe saavutamiseks on g-arv võimalikult suur ja U-arv väike.[15]

Akna suurus, orientatsioon ja varjestatus mõjutavad ruumi valgustatust ja temperatuuri ning järelkult ka energiakasutust [4]. Euroopas tarbivad hooned kogu energiast 40%, kuid Euroopa Liidu direktiivi kohaselt peaksid kõik uusehitised aastaks 2020 olema lähedased nullenergia majale.[1] Klaasist fassaadiga kontorihoonetel on 15% suurem energiatarbimine, kui normaalse aknapinnaga (30%) ehitistel [13]. Kui suurendada akna pindala fassaadi suhtes 14%-lt 24%-ni, paraneb Põhja-Euroopas päevavalguse kättesaadavus lõunaseinal 61% ja edasi 71%, kui akna pindala on 38%. Helsingis läbiviidud uuringus selgus, et minimaalse akna osakaaluga

(14%) lõunaseinal, on kontorites tööajal (9:00-17:00) vajaminevast valgusest võimalik saada aastas keskmiselt 40% loomulikul teel.[16] Seega tuleb fassaadi klaaspinna mõõtmed määrata nii, et oleks tasakaal mugava sisekliima ja energiatõhususe vahel.

2.3.1 Valgustatus

Maapinnale jõudnud spektraalne koostis on väga muutlik ja seetõttu saab valgustatust päikesekiirgusest lähtudes vaid ligikaudselt hinnata. Loomulik valgustatus kujuneb päikese otsese, hajusa ja aluspinnalt peegeldunud kiirguse koostoimel, mida mõjutavad Päikese kõrgus ja asimuut, atmosfääri läbipaistvus, aluspinna albeedo, pilvede liik ning hulk (joonis 4). Eestis on olulisemaks valgustatuse kujundajaks hajus kiirgus, vaid suvekuudel on otsekiirgus 20-30% võrra suurem.[7]



Joonis 4. Päikesevarjude mõju ruumi valgustatusele vastavalt Päikese keskmisele kõrgusele keskpäeval erinevatel aastaegadel.

Loomuliku valguse ehk päevavalguse iseloomustavateks parameetriteks on valgustihedus ja heledus. Valgustihedus on pinnaelemendile langeva valgusvoo ja selle elemendi pindala suhe, ühikuga luks (lx) [4]. Valgustihedust nimetatakse ka valgustatuseks [5]. Pinnaheledus on valgusvoog, mis pindadelt peegeldub ja mille

ühik on kandelat ruutmeetri kohta (cd/m^2) [17]. Nägemisvälja heledusjaotus määrab silmade adaptatsiooniseisundi, mõjutades nähtavust ja nägemismugavust [5].

Valgustingimuste arvestamine hoonete kavandamisel on arhitektidele üheks keerulisemaks ülesandeks, sest erineva orientatsiooniga aknad saavad päikesekiirgust ebavõrdselt. 1970ndatel ehitati energia kokkuhoiu eesmärgil Ameerika Ühendriikides akendeta büroohooneid, mis nüüdseks on lammutatud, sest inimesed tundsid end ebamugavalt.[4] Kaua pimedas ruumis või öövahetustes töötajatel häirub organismi bioloogiline tasakaal ultraviolettkiirguse puudumise tõttu, tekitades liigset väsimust ja stressi [17]. Teaduslikult on tõestatud, et hästi päevavalgust kasutatavates ruumides on inimesel suurem töövõime ning väheneb töölt puudumine [3,6]. Seega on loomulik valgus heaoluks vajalik sisekliima komponent.

Enamasti viibib täiskasvanud inimene vähemalt poole ärkveloleku ajast töökohas, kus normaalsete valgustingimuste tagamine on vastavalt määrusele "Tegevusaladele esitatavad töötervishoiu ja tööohutuse nõuded", tööandja kohustus [18]. Ruumide normaalne valgustatus saavutatakse loomulikul teel või tehisvalgusallikate kaasabil. Üldnõue on, et päeval tuleks kasutada loomulikku valgust, mis on inimesele vastuvõetavam.[17] Olenevalt töö iseloomust vajatakse valgustihedust 100-2000 lx, jäädes kontorite eri ruumides vahemikku 200-700 lx [4]. Töökohtade valgustatus on reguleeritud standardiga EVS-EN 12464-1 "Valgus ja valgustatus. Töökohavalgustus" 1. osa "Sisetöökohad", mille alusel on büroohoones soovituslik valgustihedus 0,8 m kõrgusel tööpiirkonnas 500 lx [5]. Eestis on suvel pilvise ilmaga horisontaalne valgustihedus 15 000-20 000 lx, mis on enam kui 30 korda suurem, kui kontoris nõutud. Seega numbrilisi näite arvestades on töökohtade soovituslik valgustihedus üsna madal.[4]

Kui vähene valgustihedus võib põhjustada tööõnnetusi, silmade väsimust ja nägemise halvenemist, siis sama mõju on ka ülemäärasel valgustatusel. Liigne heledus, selle ebasoodne jaotumine või suured kontrastid tekitavad ebamugavustunde ja esemete nähtavus halveneb. Taolist nägemisolukorda nimetatakse räiguseks.[4] Räigus avaldub ebamugavus-, pimestus- või peegeldusräigusena [5]. Võrreldes kunstliku valgusega, on samas inimene tolerantsem vähese loomuliku valgustatuse või sellest tingitud peegelduse suhtes [10].

2.3.2 Soojusmugavus

Hoone siseruumides võrdsustatakse mugavus sageli vastavusega standardile, kuid heaolu on subjektiivne ning raskesti mõõdetav. Inimene ei analüüsi keskkonda füüsilise mõõtevahendina, vaid tugineb üldmuljel.[8] Seega on soojusmugavus üldistatud karakteristik, mis saadakse heaolu hindamisel sisekliima parameetrite erinevate väärtuste korral. Soojusmugavus sõltub toas õhu liikumiskiirusest, temperatuurist ja niiskusest.[5] Kiirem õhu liikumine aitab soojas ruumis keha jahutada, kuid jahedas keskkonnas on pigem häiriv. Õhuniiskusel on väiksem mõju temperatuuri tajumisele: 10%-line niiskuse tõus on tuntav 0,3 °C temperatuuri tõusuga. Lisaks sõltub soojatundlikkus inimese füüsilisest aktiivsusest, riietusest, vanusest, soost ja tervisest.[8]

Töökoha soojusmugavus on määratletud standardis EVS-EN 15251 "Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast". Selles on toodud vastavalt hoone tüübile parameetrite tavapärased normvahemikud, mida tuleks rakendada uutes ja renoveeritavates hoonetes (tabel 1).[5] Mugavuse hindamisel on need piirväärtused olulised, kuid seejuures tuleb arvestada ka aega, mil liiga kõrge või madala temperatuuriga ruumis on viibitud. Pikaajaline väga soe või jahe töökeskkond ei ole vastuvõetav, eriti kui on kehtestatud teatud riietusnormid.[8] Paljudes ettevõtetes ja asutustes on soojusmugavuse tagamisega märgatud töö efektiivsuse kasvu.[5]

Tabel 1. Soojusmugavuse parameetrite tavapärased normvahemikud standardi EVS-EN 15251 järgi.[5]

Hoone tüüp	Operatiivne temperatuur (°C)		Õhu suhteline niiskus (%)	Õhu liikumise kiirus (m/s)	
	Talve miinimum	Suve maksimum		Suvel	Talvel
Büroo	20,0	26,0	25-60	0,22	0,18

Soojuslikku mugavust iseloomustavad kaks statistilist näitajat: oodatav rahulolematuse tase PPD (*predicted percentage of dissatisfied*), mis näitab protsentides inimeste rahulolematust, kui soojusmugavuse parameetrid jäävad

väljapoole kehtestatud vahemikust ja oodatav mugavustunde indeks PMV (*predicted mean vote*), mis väljendab suure hulga inimeste keskmist hinnet soojuslikule mugavusele seitsmepallilises skaalas (-3 kuni 3).[5]

2.4 Hoonesimulatsioon

Üha enam tuleks teha projekteerimise algusjärgus läbimõeldud otsuseid, tagades jätkusuutlik ehitise elukaar, seejuures järele andmata mugavuses, hinnas ning esteetilisuses. Projekteerimine ei saa olla intuitiivne ja teadlike valikute tegemiseks on loodud simulatsiooniprogrammid, et hinnata hoone energiavajadust ja sisekliimat.[19,20]

Esialgu arendati taolised programmid teadustöö tegemiseks, kuid liiga detailne informatsioon on arhitektidele sageli takistuseks varajaste otsuste langetamisel. Kuna hoone mugav sisekliima ja energiatõhusus on muutunud aina tähtsamaks, siis on oluline ka tavaspetsialistidel simulatsioonidest vajalike andmete saamine. See on viinud kergemate programmide loomiseni, mis võimaldavad vaid mõningate andmetega lihtsustatud arvutusi. Viimase kümne aastaga on simulatsioonid saavutanud kõrge taseme ja muutunud projekteerimise algusjärgu loomulikuks osaks.[20,21]

Energiatõhususe saavutamine nõuab teatud varajasi otsused ka fassaadilahenduses [1]. Inimeste töövõime parandamiseks ning energiatarbimise vähendamiseks on loodud spetsiaalseid programme päevavalguse maksimaalseks ärakasutamiseks. Akna paigutust ning päikesevarju lahendusi on kõige efektiivsem analüüsida arvutisimulatsioonidega, mis arvestavad hoone arhitektuuri ja kliimatingimusi.[22]

3. Materjal ja metoodika

3.1 Kliimaandmed

Analüüsi läbiviimiseks Eesti kliimas koostati Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama andmete põhjal baasaasta, mis vastab määruises "Energiatõhususe miinimumnõuded" toodud standardile EVS-EN ISO 15927-4:2005 [25]. Baasaasta faili koostas Jaanus Hallik. Andmekogum kajastab tunnilise täpsusega temperatuuri, suhtelise õhuniiskuse, pilvisuse, sademete, otsese ja hajusa päikese kiirguse ning tuule suuna, kiiruse ja külma indeksi aasta keskmisi ning maksimum-miinimum väärtusi. Samuti on loetletud igas kuus keskmine kütte- ja jahutuspäevade arv. Välja on toodud kliimaklassifikatsioon Köppeni ja ASHRAE standardite järgi, millele vastavalt on Eesti niiskes ja külmas mandrilises Dfb ja 6A piirkonnas. Käesolevas töös määrati simulatsiooniprogrammis uuritava hoone asukoht ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) kliimatsoonide järgi.

3.2 Simulatsiooniprogramm COMFEN

Uuring viidi läbi simulatsiooniprogrammiga COMFEN (*commercial fenestration*), mis on loodud USA Lawrence Berkeley riiklikus laboratooriumis. Programmiga on võimalik leida vastavalt hoone spetsiifikale sobiv fassaadilahendus, et tagada reaalses kasutamiskeskkonnas jahutus- ja küttekulude kokkuhoid ning mugav sisekliima. Eelkõige on COMFEN mõeldud projekteerimise algusjärgus akende parameetritest ja paigutusest tuleneva energiatarbimise lihtsamaks analüüsiks, millel oleks kolm peamist etappi:

- stsenaariumite defineerimine
- stsenaariumite läbiarvutamine, mille tulemusena saadakse kütte, jahutuse, valgustuse ja ventilatsiooni energiakulu, suurim energiatarbimine, CO₂ emissioon, aastane päevavalguse tase ning nägemis- ja soojustmugavus.
- erinevate fassaadilahendustega stsenaariumite võrdlemine.

Teiste sarnaste programmidega võrreldes on COMFENi eeliseks kiire ja kergesti mõistetav tagasiside, keskendudes vaid ruumile. Seega on programmi peamised kasutajad arhitektid, insenerid, fassaadimaterjalide ja akende tootjad ning

konsultandid.[23] COMFENi plussiks võib pidada ka tarkvara tasuta kättesaadavust internetis [24].

Käesolev uurimus viidi läbi 2012. aastal väljaantud COMFEN 4.1.25 versiooniga.

3.3 Uuritav Nooruse 1 hoone

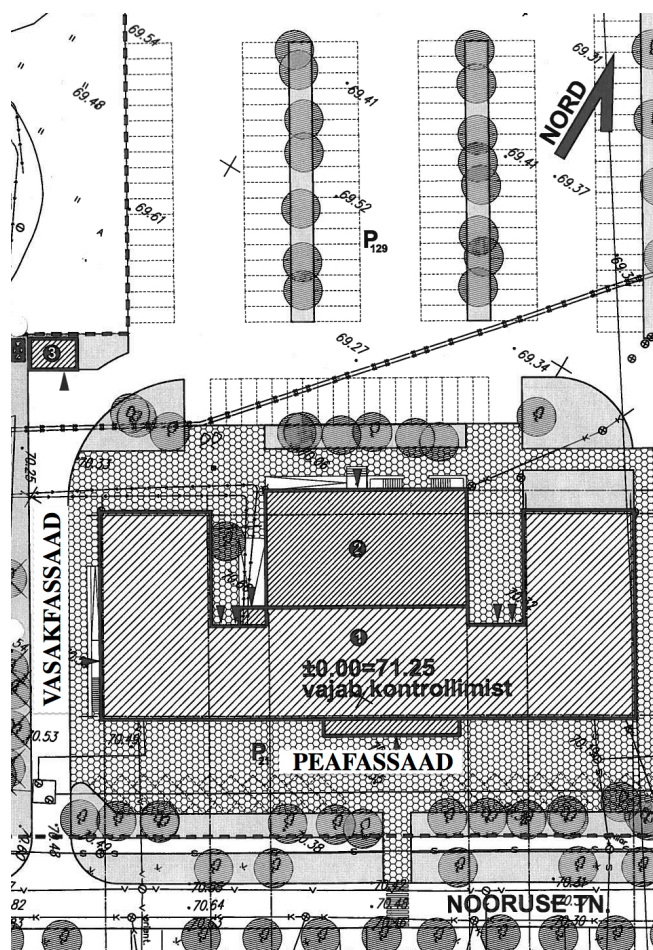
Töö analüüsis võeti aluseks Maarjamõisa tehnoloogialinnaku Nooruse 1 hoone spetsiifika. Tegemist on Tartu Ülikooli kunagise ühiselamuga, millele andsid 2005. aastal praeguse väljanägemise arhitektid Uku Põllumaa ja Mart Ader. Juurdeehitus planeeriti peamiselt loodeküljele, lisaks projekteeriti kuues ja seitsmes korrus. Esimesele korrusele tehti auditoorium 160-le inimesele ja söökla. Kahel esimesel korrusel on kabinetid ja tööruumid, kolmandal korrusel keskkonnatehnoloogia, neljandal biomeditsiini ja viiendal materjali arenduskeskused koos laboritega. Juurdeehitatud kuuendal ja seitsmendal korrusel on farmaatsia instituudile vajalikud ruumid: laborid, auditooriumid ja arvutiklass. Seega on hoone oluliseks funktsiooniks ühendada erinevad teadus- ja arenduskeskused, mis on eelkõige suunatud noortele teadlastele.[26] Tehnoloogiainstituudi hoone üldised andmed on ära toodud tabelis 2.

Tabel 2. Nooruse 1 hoone üldised andmed [26].

Ehitisealune pindala	1795 m ²
Korruste arv	7+ kelder
Kõrgus	25,8 m
Pikkus	69,4 m
Laius	27,0 m
Maht	353000 m ³
Kõetav pind	8917 m ²

Töö esimeses etapis defineeriti COMFENis Nooruse 1 hoone parameetrid ja leiti efektiivne päikesevarjudega fassaadilahendus igas põhi- ja vaheilmakaares. Uuringu teine pool vaatles hoone pea- ja vasakfassaadi, mis on vastavalt kagu- ja edelasuunalised, sest projekti põhi on 31° vastupäeva tegelikust põhjast (joonis 5) [26]. Uuritavatele akendele püüti leida võimalikult optimaalne päikesevarjusüsteem,

kuna peamiselt kevadine ja suvine päikeseikiirgus muudab sealsete ruumide töötingimused ebamugavaks, tekitades valgusräigust ja liigsoojust.



Joonis 5. Nooruse 1 hoone plaan [26].

3.4 Hoone parameetrite defineerimine

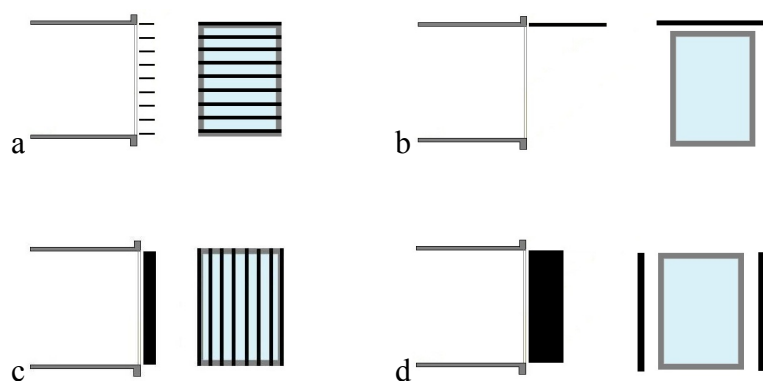
COMFENis määrab hoone tüübi valimine vaikimisi sisekliimat mõjutavate parameetrite graafikud (lisa 1). Katse viidi läbi kontori tingimustes ja seega oli ventilatsiooni õhuvooluhulgaks $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ inimese kohta. Ruumide jahutamiseks kasutati mehaanilist ventilatsiooni, mis eeldas suletud aknaid. Mehaaniline jahutus ei lase ruumide temperatuuril tõusta üle $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ning tagab stabiilsemad ja mugavamad sisetütingimused. Katsed näitasid, et loomuliku ventilatsiooni korral tõuseksid suvised toa temperatuurid üle $26 \text{ }^\circ\text{C}$, sest aknad suletakse, kui välisõhk on soojem võrreldes siseruumidega.

Hoone uuritava fassaadi paiknemine ilmakaarte suhtes anti kraadise täpsusega, muutes projekti põhja, mis mõõdeti päripäeva tegelikust põhja suunast. Sein ja akna defineerimiseks kasutati Nooruse 1 rekonstrueerimis- ja juurdeehitusprojekti. Vastavalt joonisele "Lõigete fragmendid 1-9" fragment 3 järgi, loodi COMFENis sein peamiselt kipskrohvist, klaasvillast ja savitellistest, soojajuhtivusega $0,30 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$. Joonise "Akende spetsifikatsioon (A1-A9)" järgi on samale seinale paigaldatud kõige rohkem (144) alumiiniumraamiga kahekordseid klaaspakettaknaid.[26] Kuna katses kasutati mehaanilist jahutust, siis muudeti antud aken mitte avatavaks. COMFENi järgi oli aknapinna osakaal fassaadi suhtes 25%. Täpsemad sein ja akna parameetrid on toodud lisas 2.

Uuritava hoone ühe aknaga kontoriruumi põrandapindala on keskmiselt $16,88 \text{ m}^2$, mis võeti aluseks ka analüüsi läbiviimisel.[26]

3.5 Päikesevarjude tüübid

Käesolevas töös analüüsiti kolme välisfassaadile fikseeritud päikesevarju: horisontaalne sirm (*overhang*), vertikaalsed sirmid (*fins*) ja ribid (*venetian blinds*) (joonis 6). Kõikide varjude kaldenurk oli uuringu läbiviimisel 90° aknapinna suhtes. Samuti jäid ribide parameetrid töö käigus muutumatuks (tabel 3).



Joonis 6. Uuritavad päikesevarjud kül- ja eestvaates. a – horisontaalne ribi; b – horisontaalne sirm; c – vertikaalne ribi; d – vertikaalne sirm.

Tabel 3. Vertikaalsete ja horisontaalsete ribide liistu parameetrid

Pikkus	8,89 cm
Laius	145 cm
Kõrgus	5 cm
Liistude vahe	10 cm
Materjal	alumiinium
Kaldenurk	90°

Igas põhi- ja vaheilmakaares leiti simulatsiooniprogrammi arvutustega kaks kõige efektiivsemate mõõtmetega horisontaalset ja vertikaalset sirmi. Valiku tegemisel võeti arvesse ruumi sisekliimat mõjutavad tegurid nagu valgustatus, peegeldus, temperatuur, aga ka kogu energia kütteks ja jahutuseks, CO₂ emissioon ning päikese vabasoojuse hulk akna- ja põrandapinnale.

Andmeanalüüsiks kasutati Microsoft Excelit ja Mac OS X Ploti [27].

4. Tulemused ja analüüs

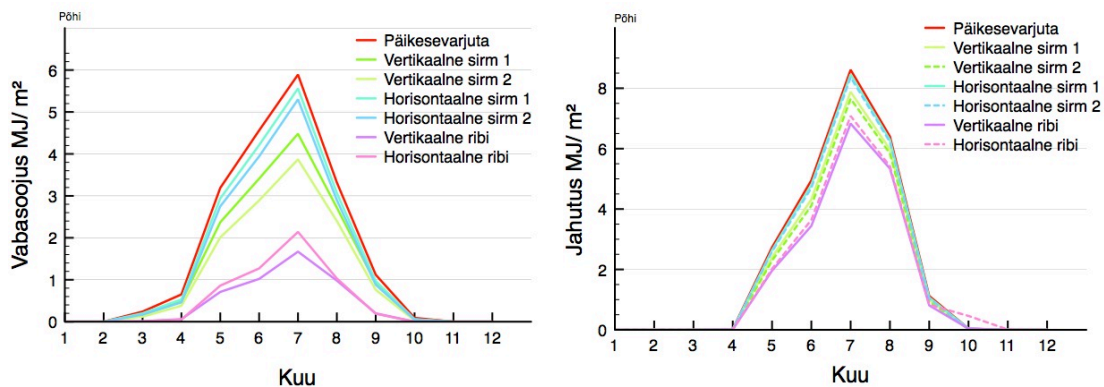
Katse esimese etapi eesmärk oli leida põhi- ja vaheilmakaartes potentsiaalsed päikesevarjud, arvestades Eesti kliima eripärasid. Selleks võrreldi omavahel sirmide ja ribide mõju ruumi sisekliimale ja energiavajadusele. Ribide parameetrid jäid kogu katse vältel samaks. Sirmide mõõtmeid muudeti vastavalt efektiivsusele: igas ilmakaares valiti kaks horisontaalset ja vertikaalset sirmi (lisa 3).

Katse teises pooles leiti Nooruse 1 hoone pea- ja vasakfassaadile päikesevarjud. Uuringus toodi välja mõlemale seinale kaks optimaalset lahendust ning põhjalikum analüüs COMFENiga.

4.1 Päikesevarjud erinevates ilmakaartes

4.1.1 Põhjafassaad

Põhjaseinale langev valgustatus oli suurem suvel kell 11:00-14:00, kuid jäi alla 2000 luksi, mida loetakse kasulikuks piiriks, sest see ei ole veel ebamugav ja kunstlikku valgustust ei ole vaja kasutada.[28] Kuigi sirmide mõõtmed olid väikesed, suurenes päikesevarjudega ruumis intensiivse kiirguse korral peegeldusräigus. Põhja suunal oli kõige väiksem päikese vabasoojus ja jahutusvajadus, mida enam mõjutasid ribid. Juuli maksimaalne vabasoojus põranda pindala kohta vähenes vertikaalse ribiga 72% ning jahutus horisontaalse ribiga 21% (joonis 7). Ribide puhul võis täheldada ka olulist loomuliku valguse vähenemist.

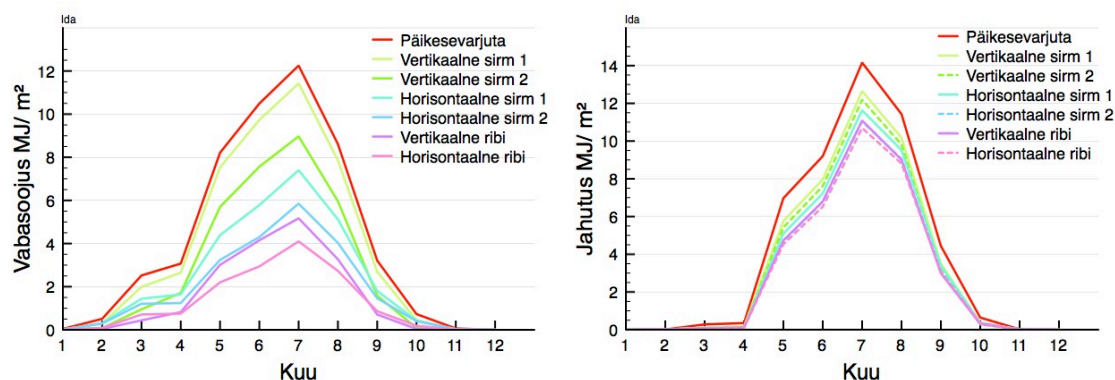


Joonis 7. Põhjasuunalise ruumi päikese vabasoojus põranda pindala kohta ning jahutuskooormus päikesevarjudega ja ilma.

Üldiselt vähendasid päikesevarjud põhjafassaadil liialt passiivset küttevõimalust ja päevavalgust. Kuna põhjapoolsetes ruumides päikesekiirgusest tingitud räguse ja ülekütmise ohtu ei ole, siis päikesevarjude kasutamine ei ole vajalik.

4.1.2 Idafassaad

Idaseinale oli intensiivsem kiirgus suvel päikesetõusust ennelõunani. Võrreldes põhjafassaadiga, siis päikesevarjude mõõtmed suurenesid. Hommikust madalat Päikest blokeeris horisontaalne sirm efektiivsemalt akna peal [29]. Eredat kevadist ja suvist päevavalgust alla 2000 luksi varjutasid horisontaalne ja vertikaalne sirm 2 ning ribid. Idasuunalistes ruumides kasvas päikese vabasoojus ja jahutusvajadus umbes poole suuremaks võrreldes põhjafassaadiga. Kõige enam vähendasid põranda pinna kohta vabasoojust ja jahutuskooormust horisontaalsed ribid juulis, vastavalt 67% ning 24% (joonis 8). Üldiselt viisid ribid toa loomuliku valgustatuse liiga madalaks. Seega optimaalsem oleks idafassaadil kasutada horisontaalseid sirme, mis on aknast laiemad ja paiknevad umbes ühel kolmandikul aknal.

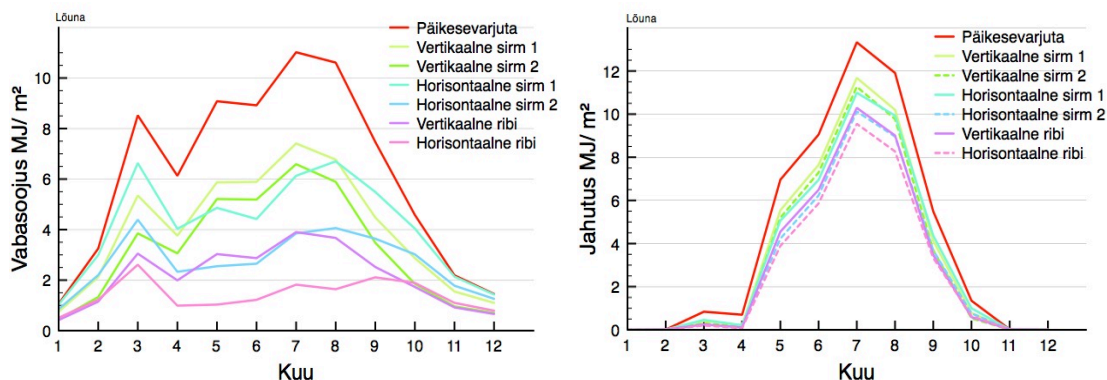


Joonis 8. Idasuunalise ruumi päikese vabasoojus põranda pindala kohta ning jahutuskooormus päikesevarjudega ja ilma.

Simulatsioonikatsed on näidanud, et ida suund on Eesti tingimustes kõige problemaatilisem ja absoluutselt efektiivne varjestus selle külje päikesekiirguse blokeerimiseks puudub [3].

4.1.3 Lõunafassaad

Intensiivsem päikesekiirgus oli lõunas keskpäeval kell 12:00-14:00 ning peamiselt kevade alguses. Lõunaseinale oli üldiselt ka kõige suurem valgustatus [28], mida alla 2000 luksi varjutasid vaid ribid. Lõuna suunal saavutab Päike suurima kõrguse, mille otsekiirgust blokeerisid efektiivsemalt horisontaalsed sirmid. Vaatamata vertikaalsete sirmide maksimum pikkusele, vähendas horisontaalne sirm 2 kevadist valgusräigust paremini, olles peaaegu võrdne ribidega. Antud katses jahutuskooormus lõunapoolses ruumis vähenes, võrreldes lääne- ja idasuunaliste tubadega. Samas on simulatsioonide tulemused näidanud, et võrdsete projekteerimise lähteandmete korral on suurim jahutusvajadus lõunas [4]. Varjud vähendasid päikese vabasoojust ja jahutust lõunas kõige enam. Horisontaalsetel ribidel olid kesksuvel antud näitajad vastavalt 84% ja 29%. Kevadine järsk vabasoojuse langus on tingitud lume sulamisest, mistõttu maapinna albeedo väheneb ja kiirgus tупpa langeb (joonis 9).

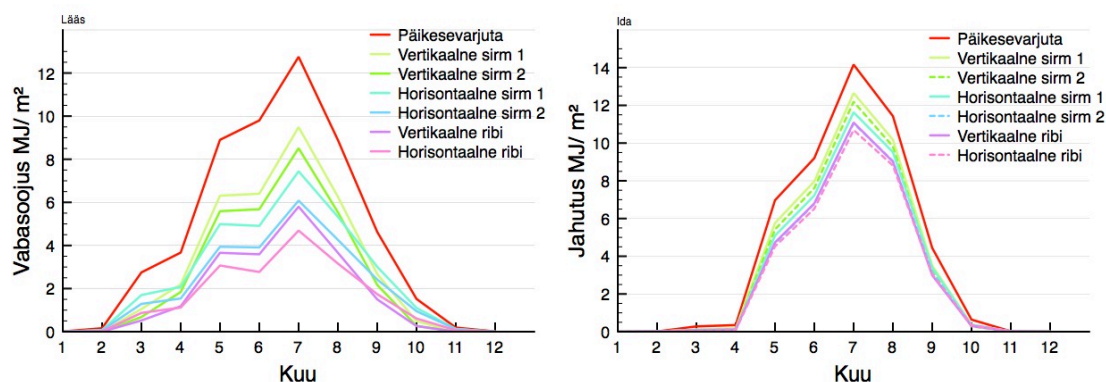


Joonis 9. Lõunasuunalise ruumi päikese vabasoojus põranda pindala kohta ning jahutuskooormus päikesevarjudega ja ilma.

Keskpäevane intensiivne päike lõunafassaadil muudab sageli töötingimused ebamugavaks. Seega tuleks ruumide sisekliima parandamiseks kasutada lõunasuunalistel akendel päikesevarje, mis aitaksid Eesti laiuskraadil edukalt vältida otsekiirgust. Blokeeritud kiirgus suvekuudel tähendab ka madalamat energiakulu jahutusele [3].

4.1.4 Läänefassaad

Läänefassaadi mõjutas otsene päikeseikiirgus intensiivsemalt suvise tööpäeva lõpus kell 15:00-19:00 ning sarnaselt lõunaseinaga oli suure valgustatusega.[28] Madala loojuva Päikese tõttu olid horisontaalsed sirmid akna peal efektiivsemad ning suurima pikkusega. Ribid varjutasid päikeseikiirgust kõige paremini, kuid viisid ruumi valgustatuse liiga madalale. Optimaalse valgustatuse, alla 2000 luks, saavutasid ka horisontaalne ja vertikaalne sirm 2. Otsene päikeseikiirgus oli lääne ja ida suunal peaaegu võrdne, kuid läänes on kõrgem jahutuskooormus. Põhjuseks on hajus kiirgus ja ruumisise vabasoojus, mis hoone konstruktsiooni üles soojendab ajaks, mil otsekiirgus hakkab mõjutama läänefassaadi.[4] Päikese vabasoojus ja jahutuskooormus vähenesid juulis kõige rohkem horisontaalsete ribidega, vastavalt 63% ja 25% (joonis 10).



Joonis 10. Läänesuunalise ruumi päikese vabasoojus põranda pindala kohta ning jahutuskooormus päikesevarjudega ja ilma.

Päikesevarje võiks kasutada olukorras, kui ruumides viibitakse kella 17:00ni, sest varjude potentsiaal oleks sellisel juhul võrreldav lõuna suunaga [4].

4.1.5 Vaheilmakaared

Kirde ja loode suunal jäid sirmide mõõtmed väikseks, sest päikesekiirgus fassaadile ei ole nii intensiivne. Mõlemal juhul püsis valgustatus ka ilma päikesevarjudeta alla 2000 luksi taseme. Ruumi jahutusvajadust kirde- ja loodesuunalised varjud pigem ei vähendanud, kuid ribidel oli oluline mõju ruumi päikese vabasoojuse vähendamisele. Üldiselt põhjalähedastel fassaadidel ei ole vajalik päikesevarjude kasutamine, sest sageli suurendavad nad päikese peegeldust tuppa.

Kagusuunaliste horisontaalsete sirmide mõõtmed suurenesid oluliselt ja vertikaalsete sirmide mõõtmed jäid samaks idafassaadi sirmidega. Ribid ja horisontaalsed sirmid vähendasid tunduvalt ruumi päikese vabasoojust ja jahutusvajadust.

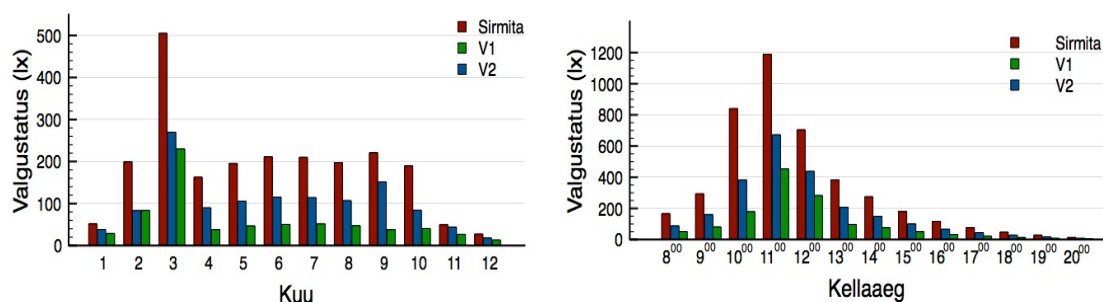
Edelifassaadil olid horisontaalsed ja vertikaalsed sirmid suuremõõtmelised. Kiirgustingimused on edelas kõige keerulisemad, kuna Päike on suvel veel kõrge, kuid loojumas ja talvel väga madal. Seetõttu on efektiivsem lai horisontaalne sirm akna peal. Ribid vähendasid ruumi päikese vabasoojust, kuid muutsid toa loomuliku valgustatuse madalaks.

4.2 Nooruse 1 hoonel simuleeritud päikesevarjud

Käesoleva töö üheks eesmärgiks oli leida uuritava hoone pea- ja vasakfassaadile efektiivne päikesevari, et muuta sealsete ruumide sisekliima stabiilsemaks ja mugavamaks. Mõlemale fassaadile valiti kaks optimaalset varjusüsteemi. Lähtuti juba eelnevalt saadud tulemustest, kuid varjud defineeriti täpsemalt ja COMFENis viidi läbi põhjalikum analüüs.

4.2.1 Peafassaad

Nooruse 1 hoone peafassaad on kagusuunaline, kus intensiivsem päikesekiirgus on peamiselt varakevadel kell 10:00-12:00 (joonis 5, 11).



Joonis 11. Peafassaadi aastane ja kellajaline valgustatus päikesevarjudega ja ilma.

Lähtudes eelnevalt kagus välja valitud varjudest ja päikesekiirgusest, leiti peafassaadile kaks efektiivset päikesevarju lahendust, mille parameetrid on toodud tabelis 4. Kuna kagus mõjub pigem madal päikesekiirgus, siis on oluline, et sirm on akna peal. Madala Päikese perioodil parandab akna peale toodud sirm ruumi loomulikku valgustatust ja ennetab räigust [29]. Samas võis täheldada, et vari peab jääma ühele kolmandikule aknast, sest allapoole toodud sirm suurendab ebamugavat peegeldust. Varjusüsteemile V2 lisatud vertikaalsed osad vähendasid Päikese liikumisest tingitud küljelt tulevat kiirgust.

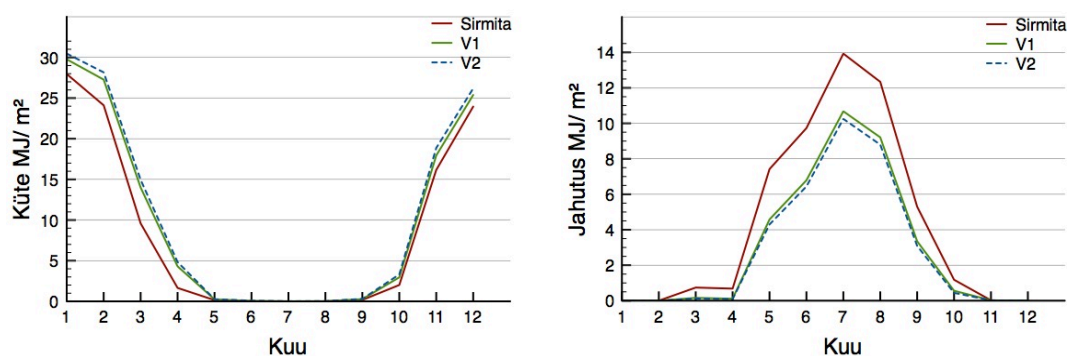
Tabel 4. Peafassaadile valitud päikesevarjude parameetrid

Mõõtmised (m)	519. Peafassaad	524. Peafassaad	
Pikkus	1,8	1,5	1,5
Laius	2,1	2,1	0,1
Kõrgus	0,1	0,1	1
Kaugus aknast	-0,42*	-0,62*	-0,42*
Tähis	V1	V2	

* akna ülemisest raamiservast

Sirmid vähendasid ruumis valgusräigust ja ülekütmist. Peafassaadi ruumide loomuliku valguse jagunemise joonised on toodud lisa 4. Üldiselt blokeerisid mõlemad varjud hästi liigset päikesekiirgust, viies kevad-suvel valguse alla 2000 luksi. Varjusüsteemil V2 esines suurem tupp peegeldumine.

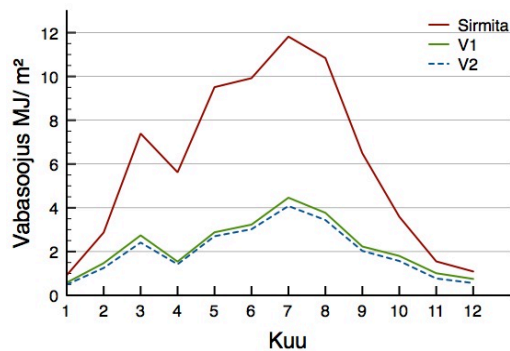
Igakuist energiatarvet küttele mõlemad sirmid pigem suurendasid, kuid jahutusele vähendasid (joonis 12). Jaanuarikuine küttevajadus suurenes sirmidega ligikaudu 8%, kuid seejuures jahutusele kuluv energia juulis vähenes kuni 29%.



Joonis 12. Peafassaadi ruumide aastane kütte- ja jahutusvajadus päikesevarjudega ja ilma.

Sirmid kahandasid oluliselt päikese vabasoojust ruumi põranda pindala ja akna välispinna kohta (joonis 13, lisa 4). Suurim alanemine oli suvel, millega kaasnes ka jahutusvajaduse langus. Talvist vabasoojust päikesevarjud niivõrd ei vähendanud, kuid siiski tõstsid ruumide küttevajadust. Jahutuse maksimum päev jäi 8. juulile ja

kütte maksimum nihkus sirmidega 2. jaanuarilt 22. jaanuarile. Üldiselt keskmine soojustugavus päikesevarjude kasutamisel vähenes 84%-lt (*PPS - predicted percentage of satisfied*) umbes 2% võrra.

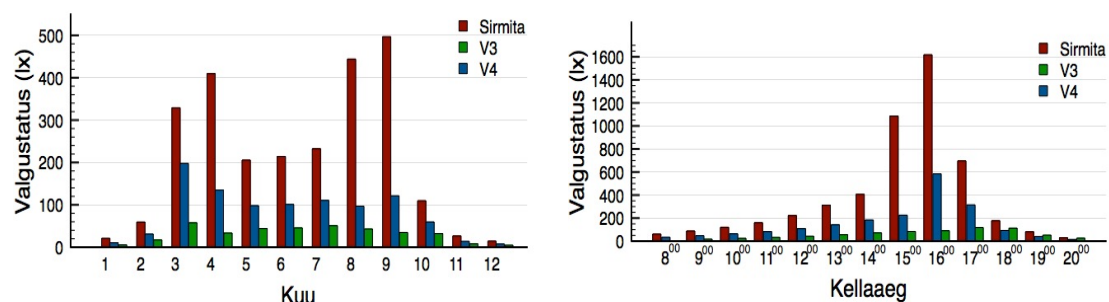


Joonis 13. Peafassaadi ruumide aastane päikese vabasoojus põranda pindala kohta päikesevarjudega ja ilma.

Üldine energiatarbimine sirmidega vähenes, mis alandas süsihappegaasi emissiooni. Päikesevarjudega fassaadi korral oli CO₂ heide 47 kg/m², V1 sirmiga 42,97 kg/m² ja V2-ga 42,03 kg/m².

4.2.2 Vasakfassaad

Uuritava hoone vasakfassaad on edelasuunaline (joonis 5). Intensiivsem päikesekiirgus esineb peamiselt kevadel ja sügisel kell 15:00-17:00 (joonis 14).





Joonis 14. Vasakfassaadi aastane ja kellajaline valgustatus päikesevarjudega ja ilma.

Edelas on üldiselt keerulisemad kiirgustingimised ja seetõttu olid vasakfassaadile välja valitud päikesevarjud mitmetasandilisemad ja suuremad (tabel 5). Edelasuunas paistab Päike suvel kõrgelt, mida on efektiivsem blokeerida akna kohal sama laia

horisontaalse sirmiga. Päikeseloojangu madalat kiirgust on võimalik varjata nii akna peal oleva horisontaalse, kui ka lühemate vertikaalsete sirmidega akna kõrval. Päikesevarju lahendust V4 on nimetatud ka "muna karbiks", mille horisontaalne element blokeerib pärastlõunast kõrgemat ja vertikaalsed osad hiljem madalamat päikesekiirgust [9].

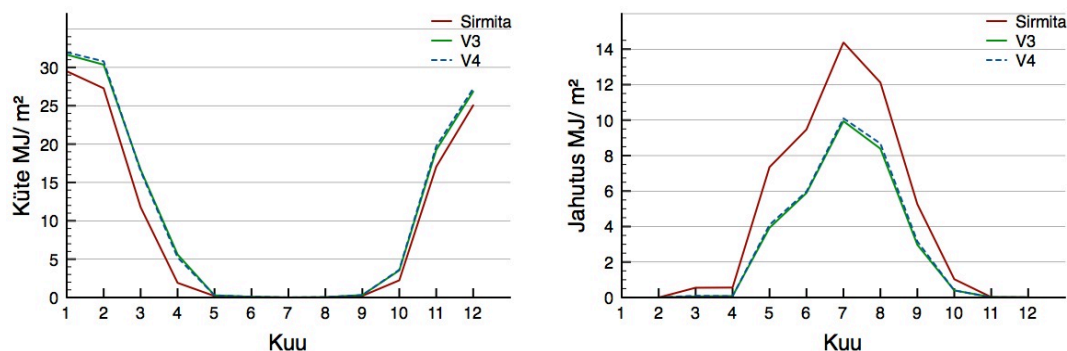
Tabel 5. Vasakfassaadile valitud päikesevarjude parameetrid

Mõõtmed (m)				
Pikkus	1	1,5	1,5	
Laius	1,45	2,26	1,45	0,1
Kõrgus	0,1		0,1	1
Kaugus aknast	0	-0,62*	0	0
Tähis	V3		V4	

* akna ülemisest raamiservast

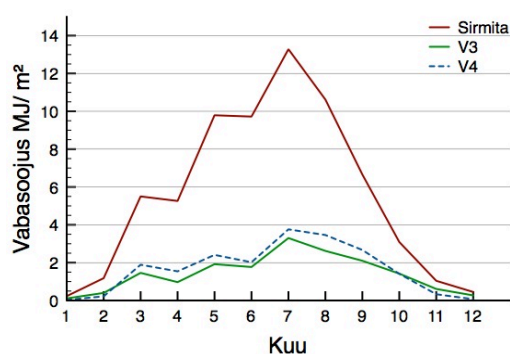
Vasakfassaadile leitud päikesevarju lahendused vähendasid ruumis valgusräigust ja ülekütmist. Loomuliku valguse jagunemine sirmidega ja ilma on toodud lisas 5. Üldiselt kaitses V3 paremini liigse päiksekiirguse eest, hoides aknalähedast valgustatust enamasti alla 2000 luksi. Samas viis V3 suvisel intensiivse otsekiirguse perioodil ruumi päevavalguse liiga madalale.

Sirmid suurendasid suhteliselt võrdselt igakuist energiatarvet küttele, kuid seejuures vähendasid oluliselt jahutusvajadust (joonis 15). Jaanuari küttevajadus suurenes sirmidega ligikaudu 7% ning juulikuine jahutusele kuluv energia vähenes kuni 31%. Võrreldes peafassaadiga, on vasakfassaadil suurem kütte- ja jahutusvajadus.



Joonis 15. Vasakfassaadi ruumide aastane kütte- ja jahutusvajadus päikesevarjudega ja ilma.

Sirmid V3 ja V4 alandasid päikese vabasoojust oluliselt nii põranda kui ka akna pindala kohta (joonis 16, lisa 5). Suurim vähenemine oli suvel, millega kaasnes ka märkimisväärne jahutusvajaduse langus. Talvine vabasoojus päikesevarjude mõjul oluliselt ei kahanenud, kuid tõstis küttevajadust. Üldiselt oli vasakfassaadile suvel suurem ja talvel väiksem päikese vabasoojus võrreldes peafassaadiga.



Joonis 16. Vasakfassaadi ruumide aastane päikese vabasoojus põranda pindala kohta päikesevarjudega ja ilma.

Kütte maksimum päev nihkus 2. jaanuarilt 22. jaanuarile vaid V4 sirmi korral ja jahutuse maksimum jäi igal juhul 8. juulile. Edelasuunaliste ruumide keskmine soojusmugavus oli ligikaudu 85% ja varjude kasutamisel langes see umbes 2% võrra.

Kogu energiatarbimine päikesevarjudega vähenes, mõjutades ka süsihappegaasi emissioon. Sirmideta fassaadi korral oli CO₂ heide 47,29 kg/m², V3 sirmil 41,89 kg/m² ja V4 sirmil 42,16 kg/m². Tehnoloogiainstituudi edelasuunalisel fassaadil oli

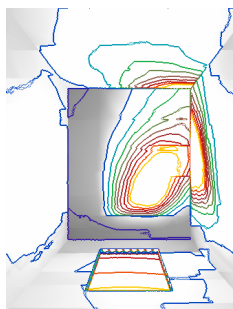
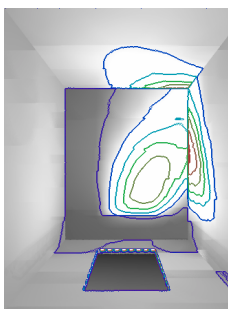
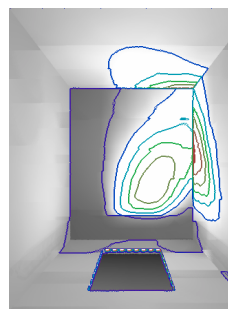
süsihappegaasi emissioon suurem, kuid sirmid vähendasid heidet rohkem kui peafassaadi päikesevarju lahendused.

5. Arutelu

Päevavalguse kavandamine, mis suuresti tähendab akende kvaliteeti, suurust, paiknemist ilmakaarte suhtes ja kaitset otsese päikese kiirguse eest, mõjutab oluliselt hoone loomulikku valgustatust ning kütte- ja jahutuskooormuse energiatarvet. Seega võib päevavalgust pidada nii otseses kui ka kaudses mõttes üheks võtmelemendiks madala elukaaremaksimumusega ehitiste projekteerimisel.[3]

Käesolevas töös oli aknapinna osakaal fassaadi suhtes 25%. Tzempelikose ja Athienitise katses Montreali büroohoones selgus, et suurem aken tõstis põhiilmakaartes kordades kütte- ja jahutusvajadust. Lõunafassaadil loeti 30% akna osakaalu piiriks, millest suurem klaasi pind enam oluliselt nägemis- ja soojust mugavust ei parandanud, vaid tõstis hoone energiatarbimist.[22] Järelikult võib arvata, et klaasfassaadiga hooneid ehitatakse pigem esteetilistel kaalutlustel ning üha enam kasutatakse nendel päikesevarje, et viia ruumide liigne valgustatus normaalsele tasemele. Ka Saksa Passiivmaja Instituut soovib suurte akendega ida-, lääne- ja lõunafassaadil kasutada erinevaid päikesevarju lahendusi, et tagada toas mugavad temperatuuri- ja valgustingimused [15].

Varasemad tööd on tõestanud, et kõrge Päikese perioodil on horisontaalsed päikesevarjud efektiivsemad ning hommikust ja pärastlõunast madalat kiirgust blokeerivad paremini vertikaalsed varjud [9]. Läbiviidud katsest lähtudes olid Eesti tingimustes horisontaalsed sirmid tõhusamad kui vertikaalsed. Ribid vähendasid kõige enam jahutusvajadust, kuid viisid toa loomuliku valgustatuse liiga madalale ning vähendasid oluliselt ka talvist passiivset küttevõimalust. Joonisel 17 on toodud näide ribide mõjust ruumi valgustatusele intensiivse otsekiirguse perioodil. Aasta keskmine päevavalgus horisontaalsete ja vertikaalsete ribidega lõunapoolsetes tubades oli vastavalt 41,53 ja 55,83 luksit.

Päikesevarjuta*Horisontaalne ribi**Vertikaalne ribi*

Luks

950 850 750 650 550 450 350 250 150 50

Joonis 17. Horisontaalsete ja vertikaalsete ribide mõju lõunasuunalise ruumi valgustatusele intensiivse otsekiirguse perioodil, 20. märtsil kell 13:00.

Sirmi mõõtmised olenevad ilmakaare kiirgustingimustest ja akna suurusel [12]. Töös selgus, et lõuna suunas on optimaalsed päikesevarjud pikemad. Samas liiga suured või väikesed sirmid võisid põhjustada tuppa peegeldumist, muutes toa sisetitingimused ebamugavaks. Suuremat peegeldumist põhjustasid vertikaalsed sirmid ja põhjafassaadi päikesevarjud. Üldiselt põhjaseinal Päikese varjestamine ei ole vajalik, sest otsekiirgust sinna ei jõua ning räiguse ja ülekütmise probleemi ei teki.

Optimaalse suurusega sirm vähendab hoone kogu energiatarbimist, seejuures jahutusele kuluvat energiat eri piirkondades koguni 23%-89% [11,12]. Antud katses vähenes jahutus maksimaalselt lõunasuunalistes ruumides 29% ja kõige vähem põhjas 21%. Jahutusvajaduse kaudu võis hinnata ka ruumi soojusmugavust. Seega tõusis lõunapoolsetes tubades temperatuur sagedamini üle 24 °C, mis tingis intensiivsemat jahutust heaolu tagamiseks. Üldiselt soojusmugavus päikesevarjude kasutamisega langes ligikaudu 2% võrra. Hoone kogu energiakulu vähenemine tõi kaasa ka süsihappegaasi emissiooni alanemise. Nooruse 1 hoone pea- ja vasakfassaadile kavandatud päikesevarjud vähendasid CO₂ heidet keskmiselt 5 kg/ m².

Käesolevas uuringus oli lõunas madalam jahutuskogumus, võrreldes ida- ja läänepoolsete tubadega. Samas on simulatsioonide tulemused näidanud, et jahutuskogumus on suurim lõunasuunalistes ruumides, järgnevad lääts, ida ja põhi [4]. Seda võib seletada lõunas tõhusamate päikesevarjudega, sest idas ja läänes on üldiselt keerulisemad kiirgustingimused, mida on raskem varjestada ning päikese vabasoojus

kütäb rohkem tuba.

Mitmed uuringud on tõestanud, et päikesevarjud võivad olla ainukesed lahendused liigse loomuliku valgustatuse vähendamiseks [10]. Samas ei suuda ükski vari täielikult vältida ida- ja läänesuunal otsest madalalt päikeseikiirgust, isegi 1.5 m aknapealne vari lõunaseinal. Kuigi sirmid tagavad otseikiirguse blokeerimise enamuse päevast, on soovituslik kasutada ka sisemisi aknakatteid [29]. Üldiselt aitavad päikesevarjud parandada ruumi soojusmugavust ning vähendada oluliselt jahutuse energiatarvet [11]. Võib täheldada, et hoone kogu energiatarve suureneb, kui pikemate külgede orientatsioon on lääne- ja idasuunaline [12]. Seega on varjude kasutamine büroohoonetel nendes ilmakaartes soovituslik, sest just hommikune või pärastlõunane päikeseikiirgus mõjutab töötingimusi.

6. Kokkuvõte

Simulatsiooniprogrammid aitavad üha enam hoonete kavandamisel teadlike valikute tegemist. Käesolev töö näitas, kui oluline on projekteerimise algusjärgus läbi mõelda fassaadilahendus, et vähendada tubades päikesest tingitud ülekütmise ja räiguse probleeme. Päikesevarjud, kui passiivse arhitektuurilise jahutuse meetod, peaksid leidma olulist kasutamist ka Põhjamaade kliimas.

Töös analüüsiti Nooruse 1 hoone alusel kolme fikseeritud päikesevarju tüüpi: horisontaalne sirm (*overhang*), vertikaalsed sirmid (*fins*) ja ribid (*venetian blinds*). Igas põhi- ja vaheilmakaares leiti simulatsiooniprogrammiga COMFEN kaks kõige efektiivsemate mõõtmetega horisontaalset ja vertikaalset sirmi. Valiku tegemisel võeti arvesse ruumi valgustatust, peegeldust, temperatuuri, kogu energiat kütteks ja jahutuseks, CO₂ emissiooni ning päikese vabasoojuse hulka akna- ja põrandapinnale. Ribide parameetrid jäid ilmakaartes muutumatuks. Katse teises pooles leiti uuritava hoone pea- ja vasakfassaadile kaks efektiivset päikesevarjusüsteemi, et tagada ruumides mugavam ja stabiilsem töökeskkond. Lähtuti eelnevalt valitud sirmidest ning toodi välja põhjalikum analüüs.

Arvestades, et lõunafassaad saab ligikaudu 13 korda rohkem otsest päikesekiirgust kui põhjasein, siis sirmide mõõtmed lõuna pool suurenesisid. Ribid vähendasid kõige enam jahutusvajadust, kuid viisid toa päevavalguse liiga madalale ning alandasid sellega oluliselt ka talvist passiivset küttevõimalust. Üldiselt olid horisontaalsed varjud tõhusamad, sest vertikaalsed põhjustasid suuremat tuppä peegeldumist, eriti põhjasuunalises ruumis. Selgus, et põhjaseinale päikesevarjude paigaldamine ei ole vajalik, kuna otsest päikesekiirgust sinna ei jõua ning räiguse ja ülekütmise probleemi ei teki.

Väljapakutud päikesevarjudega viidi tubade valgustatus alla 2000 luksi, mida loetakse räiguse piiriks. Varjude kasutamisega vähenes päikese vabasoojus ruumi põranda ja akna välispinna kohta kõige enam lõunasuunas: horisontaalsete ribidega 84%. Vabasoojuse langus tõstis küttevajadust, kuid jahutusele kuluva energia vähenemine oli ligi kolm korda suurem. Antud katses kahanes jahutus maksimaalselt

lõunasuunalistes ruumides 29% ja kõige vähem põhjas 21%. Üldiselt kogu energiatarbimine vähenes, alandades ka süsihappegaasi emissiooni. Nooruse 1 hoone pea- ja vasakfassaadile kavandatud päikesevarjud vähendasid CO₂ heidet keskmiselt 5 kg/ m².

Uuringu tulemuste põhjal võib öelda, et energia kokkuhoiu ja sisekliima parandamise eesmärgil on Eesti kliimas potentsiaali päikesevarjude kasutamiseks. Juba hoone projekteerimise algusjärgus tuleks läbimõelda Päikese varjestamine, eriti lõunapoolsetel akendel. Käesoleva töö tulemused näitasid, et horisontaalsed sirmid on tõhusamad. Samas keerulised kiirgustingimused, peamiselt ida ja lääne suunal, nõuavad edasist tööd efektiivsemate päikesevarjude leidmiseks. Tehnoloogiainstituudi hoonele väljapakutud varjulahendused on vaid üldine kontseptsioon. Kindlasti peaksid järgnevad uuringud olema detailsemad ja realistlikumad töötingimuste parandamiseks. Siinjuures on oluline meeles pidada, et saadud tulemused on Tartus, Nooruse 1 asuva hoone spetsiifilised, kuid iga maja tuleks sobivate päikesevarjude leidmisel käsitleda eraldi.

7. Summary: solar shading system performance in Estonian climate - analysis with simulation program COMFEN

The early stages of building design include difficult decisions and therefore helpful simulation programs have been developed. The fenestration is often the main key in energy efficiency and quality of indoor climate. Solar shading systems provide thermal and visual comfort, prevent overheating but permit solar heat gain in winter. Studies have been shown, that comfortable indoor environment increases productivity and reduces stress.

This paper analyses three different external solar shadings: fins, overhangs and venetian blinds in Estonian climate. The case study was Institute of Technology in Tartu and the simulation tool COMFEN was used. Firstly in eight orientations of the facade, fins and overhangs measurements were found. At the same time different parameters: glare, illumination, thermal comfort, total energy for heating and cooling, CO₂ emission and solar heat gain were taken into account. Venetian blinds values were fixed throughout the study.

Afterwards more detailed analysis was carried out to find two shading systems for main and left facade of the institute building. These walls are southeast and southwest oriented and have difficult solar radiation conditions. The aim was to improve indoor climate, especially in spring and summer, when glare and solar overheating problems occur. That is way the shadings for these facades were more complex.

The results showed that shadings depths increased in southern walls, because the south facade gets 13 times more direct solar radiation than north wall. In general, horizontal shades were more effective that verticals and venetian blinds increased glare problems, manly in northern offices. Moreover, north facade doesn't get direct solar radiation and no shades are needed. Solar shades improved indoor illumination conditions and even if the heating increased, the energy use for cooling decreased greater. The maximum decline was in south 29% and minimum in north 21%. Due to the total energy reduction, CO₂ emission decreased 5 kg/ m².

All in all, Estonian solar radiation climate is quite difficult and more research needs to be done, to find more effective solar shading devices. Shades improved indoor climate and window shading should be taken into consideration in early stages of building design even in heating-dominated climates. It is important to notice, that the results are based on Institute of Technology, but all the decisions in the designing process should take every building in specifically.

8. Tänuavaldused

Autor soovib tänada juhendajat, Tõnu Muringut, kes leidis aega aidata sisuliste nõuannetega kuni töö valmimiseni. Tänuõnad ka Nooruse 1 haldurile Leili Aderile, kes lubas kasutada hoone projekti, Jaanus Hallikule, kes koostas kliima baasaasta faili ja teistele energiatõhusa ehituse tuumiklabori töötajatele, kes abistasid tekkivate lisaküsimuste korral.

9. Kasutatud kirjandus

- [1] M. V. Nielsen, S. Svendsen, L. B. Jensen, Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight, *Solar Energy* 85 (2011) 757-768.
- [2] M.-C. Dubois, Solar shading for low energy use and daylight quality in offices, Lund Institute of Technology, Lund, 2001.
- [3] H. Voll, Passiivsete arhitektuuriliste jahutusmeetmete kasutamine ühiskondlike hoonete kavandamisel. Innovatiivne lähenemine energiakokkuhoiule, Projekt nr 1.5.0109.10-0060, Tallinna Tehnikaülikool. Kättesaadav: <http://www.ekvy.ee/attachments/article/16/Päevavalgus%20ja%20energiatõhusus.pdf> (17.05.2013).
- [4] E. Abel, H. Voll, Hoonete energiatarve ja sisekliima, Tallinn, 2007.
- [5] O. Saks, M. Vilbaste, S. Kinnas, K. Kepler, Töökeskonna füüsikaliste ohutegurite parameetrite mõõtmine, Tartu Ülikooli Keemia Instituut, 2010. Kättesaadav: http://www.sm.ee/fileadmin/meedia/Dokumendid/Toovaldkond/TAO/Töökeskonna_füüsikaliste_ohutegurite_parameetrite_mõõtmine.pdf (17.05.2013).
- [6] H. S. Lim, G. Kim, Predicted performance of shading devices for healthy visual environment, *Indoor and Built Environment* 19 (2010) 486-496.
- [7] V. Russak, A. Kallis, Eesti kiirguskliima teatmik, Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn, 2003.
- [8] G. Hausladen, M. de Saldanha, P. Liedl, C. Sager, Climate design: solutions for buildings that can do more with less technology, Birkhäuser, 2005.
- [9] G. Z. Brown, M. DeKay, Sun, wind and light: architectural design strategies, John Wiley and sons, Inc, New York, 2001.
- [10] M.-C. Dubois, Shading devices and daylight quality: an evaluation based on simple performance indicators, *Lighting Research and Technology* 35 (2003) 61-76.

- [11] W. O'Brien, K. Kapsis, A. K. Athienitis, Manually-operated window shade patterns in office buildings: a critical review, *Building and Environment* 60 (2013) 319-338.
- [12] L. Bellia, F. de Falco, F. Minichiello, Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates, *Applied Thermal Engineering* 54 (2013) 190-201.
- [13] M.-C. Dubois, Å. Blomsterberg, Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: a literature review, *Energy and Buildings* 43 (2011) 2572-2582.
- [14] Markilux, Reducing heat flow through windows, 2012. Kättesaadav: <http://markiluxawnings.wsiefusion.net/images/Page%20Content%20Images/Window%20Heat%20Transfer%20Diagram.jpg> (17.05.2013).
- [15] W. Feist, R. Pfluger, B. Kaufmann, J. Schnieders, O. Kah, Passive house planning package 2007, Passive House Institute, Darmstadt, 2010.
- [16] E. Vartiainen, Electricity benefits of daylighting and photovoltaics for various solar facade layouts in office buildings, *Energy and Buildings* 33 (2001) 113-120.
- [17] P. Tint, Töökesskkond ja ohutus, Tallinn, 2000.
- [18] Vabariigi Valitsus, 1999. Tegevusaladele esitatavad töötervishoiu ja tööohutuse nõuded. Määrus. Riigi Teataja. Kättesaadav: <https://www.riigiteataja.ee/akt/78045> (17.05.2013).
- [19] S. Petersen, S. Svendsen, Method and simulation program informed decisions in the early stages of building design, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1113-1119.
- [20] S. Attia, E. Gratia, A. de Herde, J. L. M. Hensen, Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design, *Energy and Buildings* 49 (2012) 2-15.
- [21] T. R. Nielsen, Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design, *Solar Energy* 78 (2005) 73-83.

- [22] A. Tzempelikos, A.K. Athienitis, The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand, *Solar Energy* 81 (2007) 369-382.
- [23] R. Mitchell, M. Yazdanian, K. Zelany, C. Curijs, COMFEN 4.1: program description, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2012.
- [24] Lawrence Berkeley National Laboratory, Windows and daylight. Software tools, COMFEN, 2013. Kättesaadav: <http://windows.lbl.gov/software/comfen/comfen.html> (17.05.2013).
- [25] Vabariigi Valitsus, 2007. Energiatõhususe miinimumnõuded. Määrus. Riigi Teataja. Kättesaadav: <https://www.riigiteataja.ee/akt/12903585> (17.05.2013).
- [26] A. Peedo, OÜ Tartu Tehnoloogiapark hoone Nooruse tn. 1, arhitektuurne osa, RTG Projektbüroo, Tartu, 2004.
- [27] Plot, kodulehekülg, 2007. Kättesaadav: <http://plot.micw.eu> (17.05.2013).
- [28] H. Shen, A. Tzempelikos, Daylight and energy analysis of private offices with automated interior roller shades, *Solar Energy* 86 (2012) 681-704.
- [29] E.S. Lee, A. Tavi, Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs, *Building and Environment* 42 (2007) 2439-2449.

10. Lisad

Lisa 1. Kontori sisekliimat mõjutavate parameetrite graafikud

Lisa 1.1 Kontori kütte ja jahutuse seadistatud väärtuste graafik tööpäevadel, laupäeval ja muudel päevadel [23].

	Aeg	Küte °C	Jahutus °C
Tööpäev	kuni 06:00	15,6	26,7
	kuni 22:00	21,0	24,0
	kuni 24:00	15,6	26,7
Laupäev	kuni 06:00	15,6	26,7
	kuni 18:00	21,0	24,0
	kuni 24:00	15,6	26,7
Muud päevad	kuni 24:00	15,6	26,7

Lisa 1.2 Kontori infiltratsioonikordsuse graafik tööpäevadel, laupäeval ja muudel päevadel [23].

Aeg	Tööpäev	Laupäev	Muud päevad
24:00-06:00	1	1	1
06:00-18:00	0,25	0,25	1
18:00-22:00	0,25	1	1
22:00-24:00	1	1	1

Lisa 1.3 Kontori hõivatuse, valgustuse ja elektriseadmete graafik tööpäevadel, laupäeval ja muudel päevadel [23].

Aeg	Hõivatus			Valgustus			Elektriseadmed		
	Tööp.	Laup.	Muu päev	Tööp.	Laup.	Muu päev	Tööp.	Laup.	Muu päev
24:00-5:00	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,4	0,3	0,3
5:00-6:00	0	0	0	0,1	0,05	0,05	0,4	0,3	0,3
6:00-7:00	0,1	0,1	0	0,1	0,01	0,05	0,4	0,4	0,3
7:00-8:00	0,2	0,1	0	0,3	0,01	0,05	0,4	0,4	0,3
8:00-12:00	0,95	0,5	0	0,9	0,5	0,05	0,9	0,5	0,3
12:00-13:00	0,5	0,5	0	0,9	0,5	0,05	0,8	0,5	0,3
13:00-14:00	0,95	0,5	0	0,9	0,5	0,05	0,9	0,5	0,3
14:00-17:00	0,95	0,1	0	0,9	0,15	0,05	0,9	0,35	0,3
17:00-18:00	0,7	0	0	0,7	0,05	0,05	0,8	0,3	0,3
18:00-20:00	0,4	0	0	0,5	0,05	0,05	0,6	0,3	0,3
20:00-22:00	0,1	0	0	0,3	0,05	0,05	0,5	0,3	0,3
22:00-24:00	0,05	0	0	0,1	0,05	0,05	0,4	0,3	0,3

Lisa 2. Nooruse 1 hoone sein ja akna parameetrid

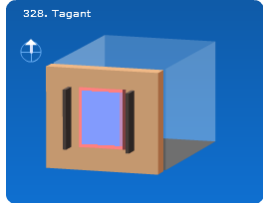

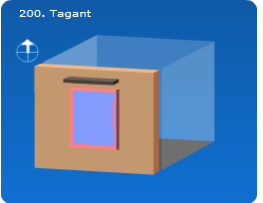
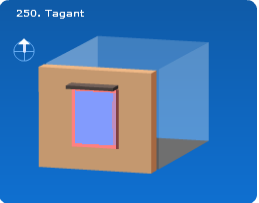

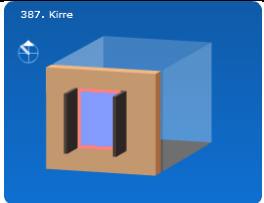
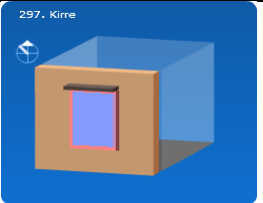
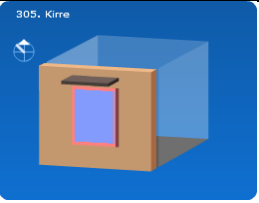
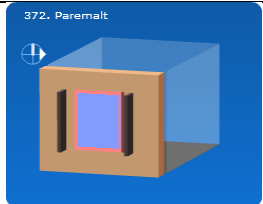
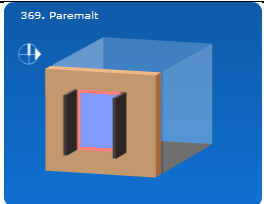
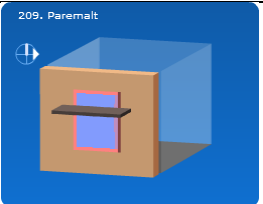
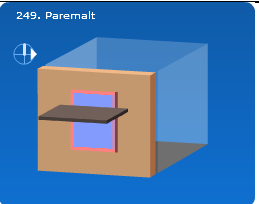



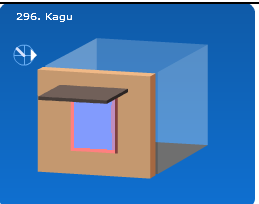
Lisa 2.1 Nooruse 1 sein peamiste materjalide parameetrid programmis COMFEN.


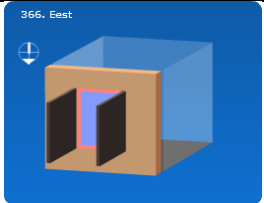

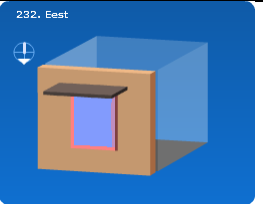

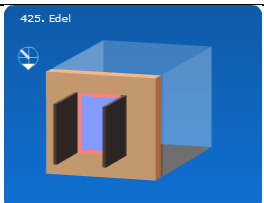
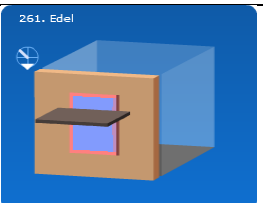
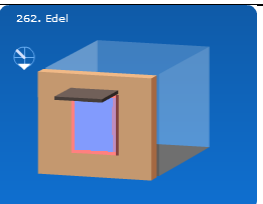



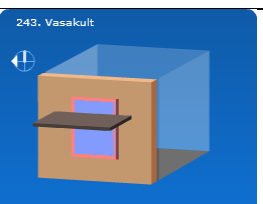




	Kihi paksus, mm	Tihedus, kg/m ³	Soojajuhtivus, W/m ² K
Kipskrohv	25,4	1,7	31,8
Klaasvill	139,7	12,0	0,3
Savitellis	101,6	1,9	8,8

Lisa 2.1 Nooruse 1 akna parameetrid programmis COMFEN.

Laius	1,45 m
Kõrgus	1,8 m
Raami kõrgus	0,057 m
Akna pindala	2,61 m ²
Nägemis pindala	2,52 m ²
Soojajuhtivus	1,65 W/ m ² K

Lisa 3. Horisontaalsete ja vertikaalsete sirmide mõõtmed vastavalt ilmakaartele programmis COMFEN

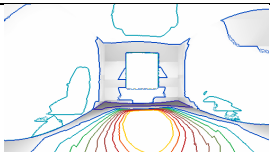
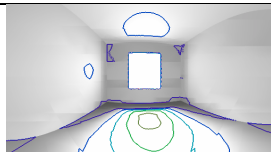
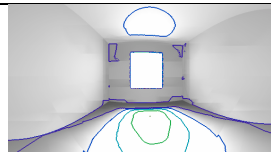
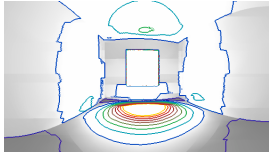
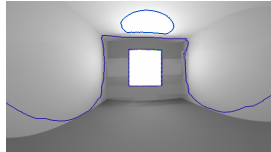
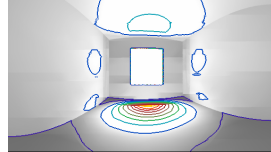
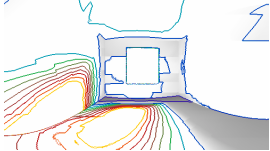
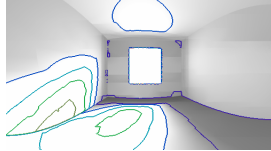
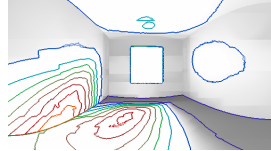
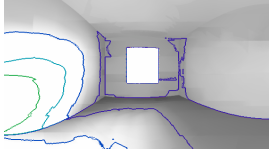
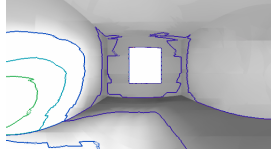
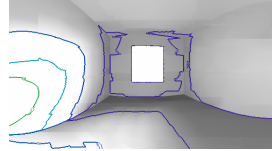
	Vertikaalne sirm 1	Vertikaalne sirm 2	Horisont. sirm 1	Horisont. sirm 2
Põhi N				
Pikkus (m)	0,5	0,5	0,5	0,5
Laius (m)	0,1	0,1	1,45	1,45
Kõrgus (m)	1,8	1,8	0,1	0,1
Kaugus aknast (m)	0,2	0	0,18	0
Kirre NE				
Pikkus (m)	0,5	1	0,5	1
Laius (m)	0,1	0,1	1,45	1,45
Kõrgus (m)	1,8	1,8	0,1	0,1
Kaugus aknast (m)	0	0	0	0,18
Ida E				
Pikkus (m)	0,5	1	1	2
Laius (m)	0,1	0,1	2,1	2,1
Kõrgus (m)	1,8	1,8	0,1	0,1
Kaugus aknast (m)	0,2	0	-0,62*	-0,62*
Kagu SE				
Pikkus (m)	0,5	1	2	2
Laius (m)	0,1	0,1	2,1	2,1
Kõrgus (m)	1,8	1,8	0,1	0,1
Kaugus aknast (m)	0,2	0	1,8	0

Lõuna S				
Pikkus (m)	1	2,5	1	1,5
Laius (m)	0,1	0,1	2,1	2,1
Kõrgus (m)	1,8	1,8	0,1	0,1
Kaugus aknast (m)	0	0	0,18	0
Edel SW				
Pikkus (m)	1,5	2	2	1,5
Laius (m)	0,1	0,1	2,1	1,45
Kõrgus (m)	1,8	1,8	0,1	0,1
Kaugus aknast (m)	0	0	-0,62*	0
Lääs W				
Pikkus (m)	1	1,5	1,5	2
Laius (m)	0,1	0,1	1,45	2,35
Kõrgus (m)	1,8	1,8	0,1	0,1
Kaugus aknast (m)	0	0	-0,62*	-0,62*
Loe NW				
Pikkus (m)	0,5	0,5	1	0,5
Laius (m)	0,1	0,1	1,45	1,45
Kõrgus (m)	1,8	1,8	0,1	0,1
Kaugus aknast (m)	0	0,2	-0,62*	0

* akna ülemisest raamiservast

Lisa 4. Nooruse 1 peafassaadi ruumide valgustatus

Lisa 4.1 Nooruse 1 peafassaadi ruumide 3D valgustatus luksides päikesekiirguse intensiivsusperioodil programmis COMFEN.

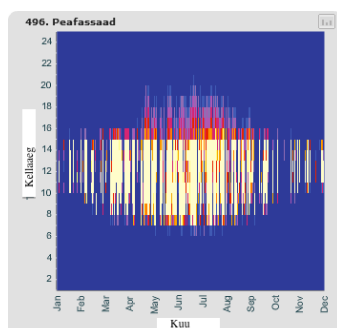
Kuu	Kellaaeg	Sirmita	V1	V2
20. märts	11:00			
20. juuni	11:00			
20. sept.	11:00			
20. dets.	11:00			

Luks

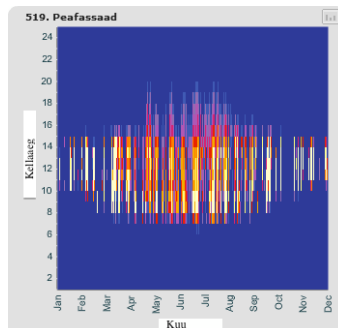


Lisa 4.2 Nooruse 1 peafassaadi päikese vabasoojuse jagunemine akna pindala kohta programmis COMFEN.

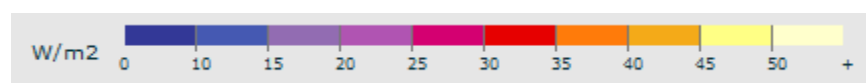
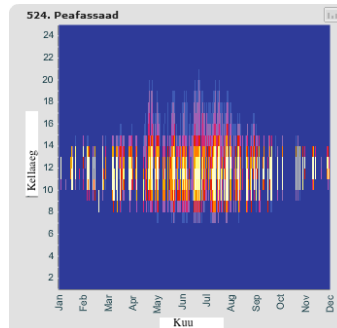
Sirmita



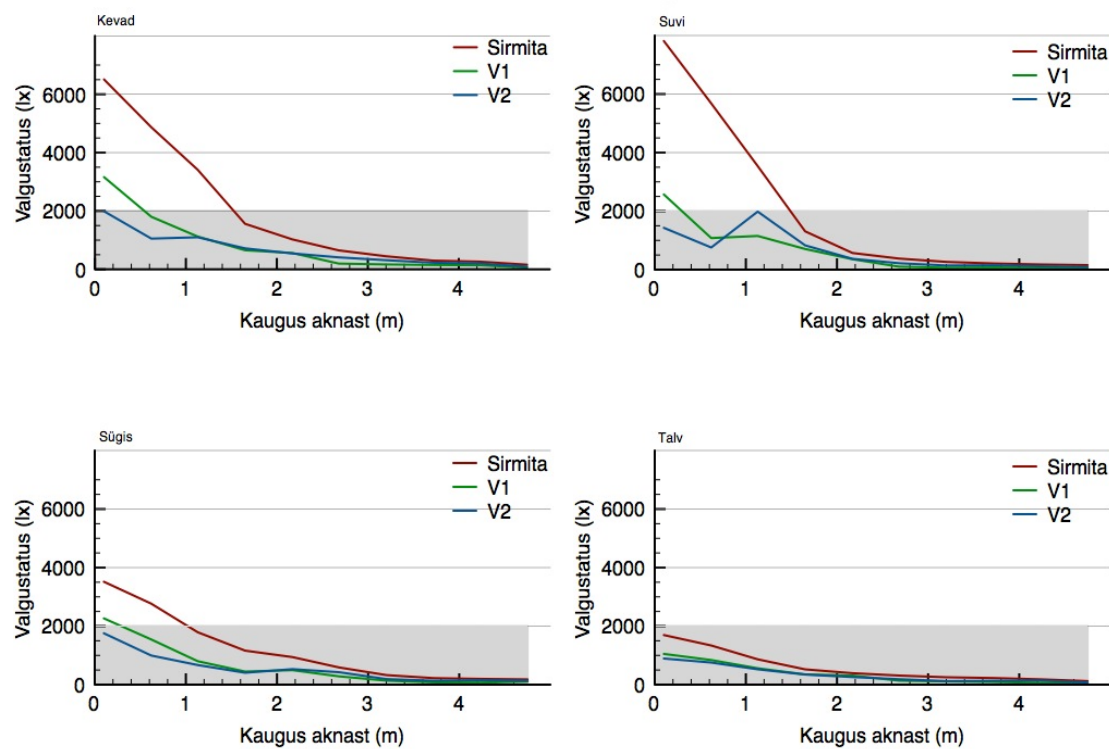
V1



V2

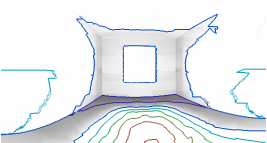
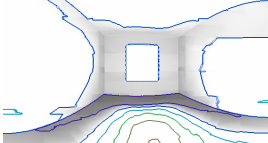
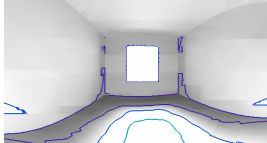
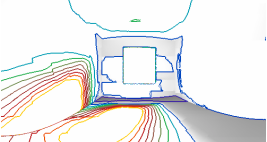
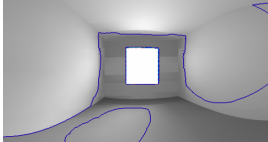
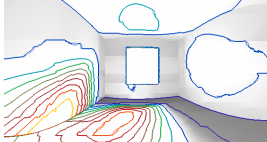
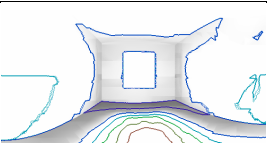
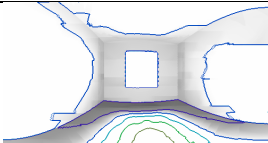
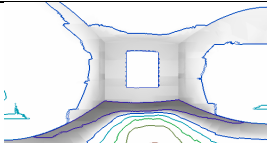


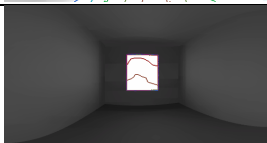


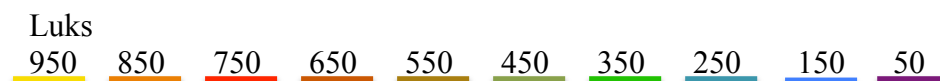
Lisa 4.3 Nooruse 1 peafassaadi ruumide valgusjaotus aknast kaugenedes programmis COMFEN.



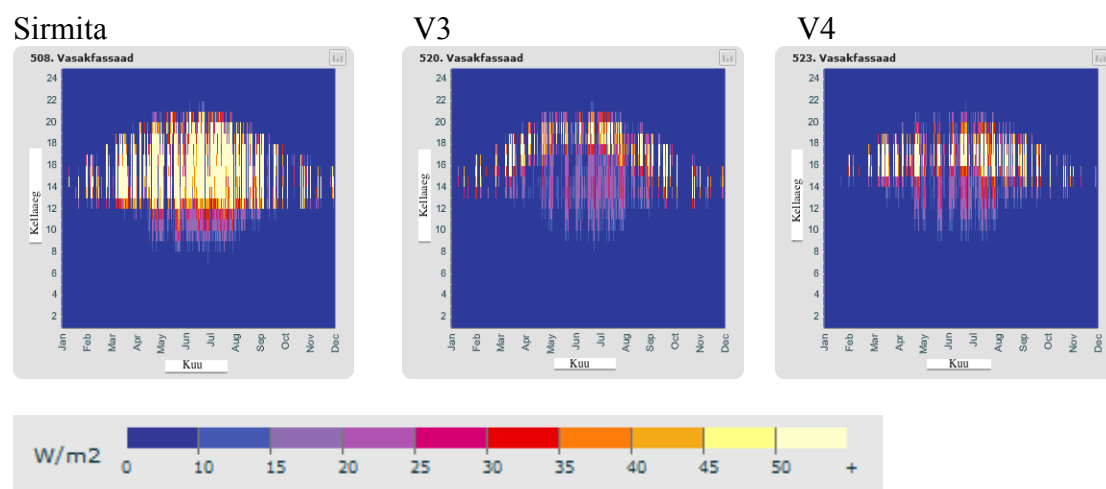
Lisa 5. Nooruse 1 vasakfassaadi ruumide valgustatus

Lisa 5.1 Nooruse 1 vasakfassaadi ruumide 3D valgustatus luksides päikesekiirguse intensiivsuseperioodil programmis COMFEN.

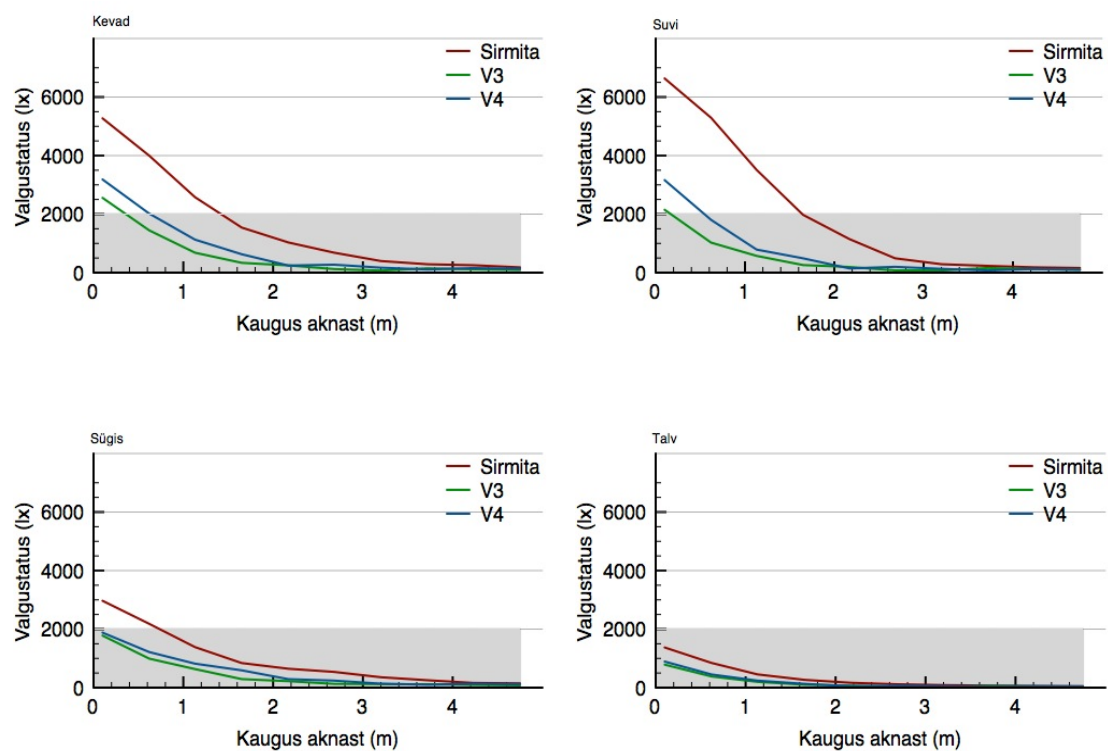
Kuu	Kellaaeg	Sirmita	V3	V4
20. märts	16:00			
20. juuni	16:00			
20. sept.	16:00			
20. dets.	16:00			



Lisa 5.2 Nooruse 1 vasakfassaadi päikese vabasoojuse jagunemine akna pindala kohta programmis COMFEN.



Lisa 5.3 Nooruse 1 vasakfassaadi ruumide valgustus aknast kaugenedes programmis COMFEN.



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Andra Ainsaar (sünnikuupäev: 23.10.1990),

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Akna päikesevarju toime Eesti kliimas - analüüs simulatsiooniprogrammiga COMFEN", mille juhendaja on Tõnu Muring,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 20.05.2013